



①9 BUNDESREPUBLIK
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES
PATENTAMT

⑫ **Offenlegungsschrift**
⑩ **DE 42 30 108 A 1**

⑤1 Int. Cl.⁵:
G 01 B 11/30
G 01 C 11/00
G 02 B 27/60

②1 Aktenzeichen: P 42 30 108.4
②2 Anmeldetag: 9. 9. 92
②3 Offenlegungstag: 10. 3. 94

DE 42 30 108 A 1

⑦1 Anmelder:
Deutsche Forschungsanstalt für Luft- und Raumfahrt
eV, 53127 Bonn, DE

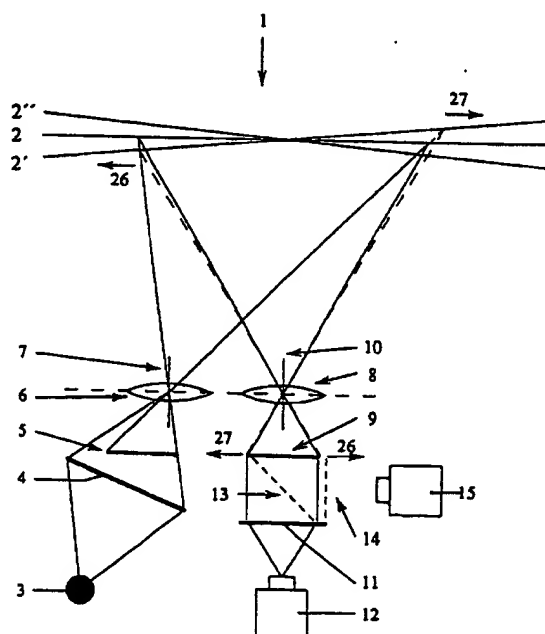
⑦4 Vertreter:
Rehberg, E., Dipl.-Ing., Pat.-Anw., 37085 Göttingen

⑦2 Erfinder:
Baumann, Peter Helmut, Dipl.-Phys., 3400 Göttingen,
DE

Prüfungsantrag gem. § 44 PatG ist gestellt

⑤4 Moiré-Verfahren und Vorrichtung zum Vermessen einer Oberfläche

⑤7 Bei einem Moiré-Verfahren zum Vermessen einer Oberfläche (2) wird ein periodisches Hellgitter auf die Oberfläche (2) projiziert. Das auf die Oberfläche (2) aufprojizierte Hellgitter wird auf ein Dunkelgitter (9) abgebildet, das etwa eine gleich große Gitterkonstante wie das darauf abgebildete Hellgitter aufweist. Eine Verteilung von durch das Dunkelgitter (9) hindurchtretenden Lichtintensitäten des darauf abgebildeten Hellgitters wird ausgewertet. Das Hellgitter ist asymmetrisch ausgebildet.



DE 42 30 108 A 1

Die Erfindung bezieht sich auf ein Moire-Verfahren zum Vermessen einer Oberfläche, bei dem ein periodisches Hellgitter auf die Oberfläche projiziert, das auf die Oberfläche aufprojizierte Hellgitter auf ein Dunkelgitter abgebildet wird, das eine gleich große Gitterkonstante wie das darauf abgebildete Hellgitter aufweist, und bei dem eine Verteilung von durch das Dunkelgitter hindurchtretenden Lichtintensitäten des darauf abgebildeten Hellgitters ausgewertet wird, sowie auf eine Vorrichtung zur Durchführung des Moire-Verfahrens.

Bei einem klassischen Moire-Verfahren wird ein Strichgitter von hinten mit einer Lichtquelle beleuchtet, wobei das Strichgitter das einfallende Licht bis auf ein Hellgitter ausblendet. Dieses Hellgitter wird mit einem ersten Objektiv auf die zu vermessende Oberfläche aufprojiziert. Mit einem zweiten Objektiv wird das auf die Oberfläche aufprojizierte Hellgitter auf ein Dunkelgitter abgebildet. Das Dunkelgitter entspricht dabei, wenn auch die beiden Objektive übereinstimmen, dem optischen Gitter, d. h. es weist dieselbe oder zumindest fast dieselbe Gitterkonstante wie das darauf abgebildete Hellgitter auf. Von dem Dunkelgitter nicht ausgeblendete Lichtintensitäten des darauf abgebildeten Hellgitters werden von einer Kamera registriert. Hierbei zeigt sich ein Linienmuster, das im Idealfall identischer Gitterkonstanten direkt Höhenlinien auf der zu vermessenden Oberfläche entspricht. Zur quantitativen Auswertung dieser Höhenlinien müssen die beiden Objektive parallel zueinander und im wesentlichen senkrecht auf die zu vermessende Oberfläche ausgerichtet sein. Die Vorteile des Moire-Verfahrens sind, daß keine besondere Präparation der zu vermessenden Oberfläche notwendig ist, daß die Vermessung der Oberfläche kontaktlos erfolgt und auch aus größerer Entfernung möglich ist, daß ein flächiges Bild der Kontur der Oberfläche erhalten wird und daß die Genauigkeit der Vermessung im Vergleich zu der dabei eingehaltenen Entfernung zu der Oberfläche verhältnismäßig groß ist. Nachteilig ist jedoch, daß aus den registrierten Lichtintensitäten die Richtung der Konturen der Oberfläche nicht entnehmbar ist. D. h., daß beispielsweise eine Wölbung ist nicht von einer entsprechenden Vertiefung unterschieden werden kann.

Aus dem Artikel "Automatic on-line measurements of 3-D shape by shadow casting Moire topography" (Reid et al., Wear, 109, Seiten 297 bis 304 (1986)) ist ein Moire-Verfahren bekannt, bei dem nach jeweiliger Phasenverschiebung eines der Gitter mindestens drei Linienmuster zu der zu vermessenden Oberfläche aufgenommen werden. Aus der Phasenverschiebung der Gitter und den einzelnen Linienmustern lassen sich dann auch die Richtungen von Konturen der Oberfläche ermitteln. Dies ist jedoch vergleichsweise aufwendig.

Aus dem Artikel "Phase shift method based on object translation for full field automatic 3-D surface reconstruction from Moire topograms" (Dirckx et al., Applied Optics, 27, 6, Seiten 1164 bis 1169 (1988)) ist eine Moire-Verfahren zum Vermessen von Oberflächen bekannt, bei dem die Oberfläche zwischen der Aufnahme einzelner Linienmuster einer Translation unterworfen wird. Auch hier sind insgesamt mindestens drei Linienmuster aufzunehmen, wenn hieraus die Richtungen von Konturen auf der Oberfläche bestimmt werden sollen. Die Auswertung der einzelnen Linienmuster gestaltet sich ebenfalls schwierig. Weiterhin ist grundsätzlich zu berücksichtigen, daß aperiodische Vorgänge, während de-

rer die Oberfläche zu vermessen ist, ein mehrfaches Aufnehmen von Linienmustern bei gleicher Stellung der Oberfläche nicht ermöglichen.

Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, ein Moire-Verfahren und eine Vorrichtung zu dessen Durchführung aufzuzeigen, bei dem zur Bestimmung der Richtung von Konturen auf der Oberfläche die Auswertung eines einzigen Linienmusters ausreicht.

Erfindungsgemäß wird dies dadurch erreicht, daß das Hellgitter asymmetrisch ausgebildet ist. Durch die Asymmetrie des Hellgitters wird erkennbar, in welcher Richtung eine Kontur der Oberfläche verläuft. D. h. die Asymmetrie des Hellgitters läßt hervortreten, ob eine Neigung der Oberfläche von den Gittern weg oder auf diese zu gerichtet ist. Die Hellgitter zur Durchführung von Moire-Verfahren aus dem Stand der Technik gehorchen sämtlich der Bedingung $I(n \cdot c - x) = I(n \cdot c + x)$. Die Lichtintensität I weist also nicht nur eine periodische Verteilung mit einer Gitterkonstanten c auf, sondern ist auch innerhalb jeder Periode symmetrisch zu deren Mittelpunkt $n \cdot c$ angeordnet. Demgegenüber gilt bei der Erfindung zumindest für eine endliche Anzahl von Punkten $I(n \cdot c - x)$ ungleich $I(n \cdot c + x)$. Auf diese Weise wird die Richtung der Phasenverschiebung des Hellgitters gegenüber dem Dunkelgitter in dem Linienmuster erkennbar. In der Richtung der Phasenverschiebung unterscheiden sich aber gerade auch die Gitter zu und von den Gittern weg gerichteten Neigungen der zu vermessenden Oberfläche.

Die oben genannte Forderung $I(c \cdot n - x)$ ungleich $I(c \cdot n + x)$ entspricht in ihrer einfachsten Interpretation der Tatsache, daß das Hellgitter Streifen mit jeweils zwei unterschiedlichen Flanken aufweist. Einfacher sind die Richtungen der Konturen der Oberfläche aber zu unterscheiden, wenn das Hellgitter Streifen mit jeweils zwei parallelen Bereichen unterschiedlicher Farbe aufweist. In diesem Fall gilt $I(n \cdot c - x)$ ungleich $I(n \cdot c + x)$ zumindest für eine der beiden Farben, wenn der Nullpunkt von x für beide Farben gleich gewählt wird. Die Richtungen der Konturen der Oberfläche sind dann dadurch zu unterscheiden, daß einmal zuerst eine Linie der ersten und erst anschließend eine Linie der zweiten Farbe beobachtet wird, während beim anderen Mal die Reihenfolge der Farben der Linien genau umgekehrt ist.

Unterschiedliche Farben der zwei parallelen Streifen entsprechend Bereichen zwar gleicher Farbe aber unterschiedlicher Polarisierungen. Hier ist allerdings die Richtung der Konturen ohne technische Hilfsmittel nicht ohne weiteres ersichtlich und es bedarf zur Auswertung des Linienmusters einer Vorrichtung, die unterschiedliche Polarisierungen der durch das Dunkelgitter hindurchtretenden Lichtintensitäten zu erkennen in der Lage ist.

Vorteilhaft weisen die beiden parallelen Bereiche der Streifen des Hellgitters jeweils gleiche Breite auf. In diesem Fall ist nur die Abfolge der Farben bzw. der Polarisierungen von der Neigungsrichtung der Oberfläche abhängig, aber nicht zusätzlich der Abstand der einzelnen beobachteten Linien.

Das Dunkelgitter kann streifenförmige, darauf abgebildete Lichtintensitäten des Hellgitters vollständig ausblendende Schwarzbereiche aufweisen, deren Breite genauso groß ist wie die Streifen des Hellgitters. Grundsätzlich können sowohl die Intensitäten des Hellgitters als auch die Durchlässigkeiten des Dunkelgitters stetige, beispielsweise sinusförmige Verläufe aufweisen. Quantitativ leichter auszuwerten sind die Linienmuster aber bei Verwendung von 1-0-Gittern, d. h. von Gittern, die

lokal entweder keine oder maximale Intensität bzw. keine oder maximale Durchlässigkeit aufweisen. Hierbei ist es zur vollständigen Ausnutzung der in der Phasenverschiebung des Dunkelgitters und des darauf abgebildeten Hellgitters enthaltenen Information sinnvoll, den Abstand der die darauf abgebildeten Lichtintensitäten des Hellgitters ausblendenden Schwarzbereiche des Dunkelgitters genauso groß zu wählen, wie die Breite der Streifen des Hellgitters.

Eine andere vorteilhafte Ausführungsform wird dadurch erreicht, daß das Dunkelgitter streifenförmige, darauf abgebildete Lichtintensitäten des Hellgitters vollständig ausblendende Schwarzbereiche aufweist, deren Abstand genauso groß ist wie die Breite jedes parallelen Bereichs der Streifen des Hellgitters. Hier werden die Intensitätsverteilungen der einzelnen Farben bzw. Polarisationen bereits durch das Dunkelgitter stärker getrennt. Dies erleichtert in Einzelfällen die Auswertung der Linienmuster.

Eine Vorrichtung zur Durchführung des neuen Moire-Verfahrens, mit einem einfallendes Licht bis auf ein Hellgitter ausblendenden, optischen Gitter, einer das optische Gitter von hinten beleuchtenden Lichtquelle, einem das Hellgitter auf eine Oberfläche projizierenden ersten Objektiv, einem das auf die Oberfläche aufprojizierte Hellgitter auf ein Dunkelgitter abbildenden und parallel zu dem ersten Objektiv ausgerichteten zweiten Objektiv und mit einer von dem Dunkelgitter nicht ausgeblendete Lichtintensitäten des darauf abgebildeten Hellgitters registrierenden Kamera ist erfindungsge-
mäß dadurch gekennzeichnet, daß das optische Gitter in jeweils zwei Bereiche mit unterschiedlichen optischen Eigenschaften aufgeteilte Durchtritte aufweist und daß die Kamera die optischen Eigenschaften der beiden Bereiche unterscheidet. Statt der einen, die optischen Eigenschaften der beiden Bereiche unterscheidenden Kamera kann auch im Strahlengang hinter dem Dunkelgitter ein Strahlteiler angeordnet sein, der die durch das Dunkelgitter hindurchtretenden Lichtintensitäten in zwei Teilstrahlen aufspaltet, wobei in den beiden Teilstrahlen jeweils separate, die Lichtintensitäten mit den optischen Eigenschaften eines der beiden Bereiche registrierende Kameras angeordnet sind. Im einfachsten Fall weisen die Durchtritte des optischen Gitters zwei Bereiche unterschiedlicher Farbe auf und in die Kamera zur Registrierung der Lichtintensität ist ein Farbfilm eingelegt. Bei einer computergestützten Auswertung der Lichtintensitäten mag es jedoch häufig von Vorteil sein, die Lichtintensitäten mit den optischen Eigenschaften jeweils eines der beiden Bereiche von vornherein getrennt aufzuzeichnen. Dies kann mit zwei verschiedenen Kameras unter Verwendung eines Strahlteilers erfolgen. Besonders einfach hinsichtlich des, Justieraufwands dürfte jedoch der Einsatz einer Farbkamera sein.

Das optische Gitter ist in vorteilhafter Weise durch Abfotografieren einer farbigen Vorlage herstellbar. Hierdurch ist es möglich, die Durchtritte des optischen Gitters in zwei Bereiche unterschiedlicher Farbe aufzuteilen und dennoch geringe Gitterkonstanten zu erreichen. Die Gitterkonstanten bestimmen direkt die Auflösung beim Vermessen der Oberfläche. In diesem Zusammenhang ist es erwähnenswert, daß bei dem neuen Verfahren und der neuen Vorrichtung durch die Aufteilung der Streifen des Hellgitters bzw. der Durchtritte des optischen Gitters in zwei parallel zueinander angeordnete Bereiche die effektive Gitterkonstante um bis zu einem Faktor 2 verbessert wird. D. h., das farbige Hellgitter entspricht bei günstiger Gestaltung einem norma-

len Gitter mit halb so großem Streifenabstand.

Die Erfindung wird im Folgenden anhand von Ausführungsbeispielen näher erläutert und beschrieben. Es zeigt:

Fig. 1 eine Vorrichtung zur Durchführung des Moire-Verfahrens,

Fig. 2 ein Hell- und ein Dunkelgitter zur Verwendung bei einer ersten Ausführungsform des Moire-Verfahrens,

Fig. 3 ein Hell- und ein Dunkelgitter zur Durchführung bei einer zweiten Ausführungsform des Moire-Verfahrens,

Fig. 4 Intensitätsverläufe zu verschiedenen Ausführungsformen des Moire-Verfahrens und

Fig. 5 ein bei einer Durchführung des Moire-Verfahrens gewonnenes Linienmuster im zweidimensionalen Schnitt.

Die in Fig. 1 dargestellte Vorrichtung 1 dient zur Durchführung eines Moire-Verfahrens zum Vermessen einer Oberfläche 2. Dabei interessiert die Kontur der Oberfläche 2. Als Beispiel für eine Neigung der Oberfläche 2 innerhalb ihrer Kontur dient hier die Verkipfung der Oberfläche 2 in die Stellungen 2' und 2''. Die Vorrichtung 1 weist eine Lichtquelle 3 auf, die unter Zwischenschaltung einer Linse 4 ein optisches Gitter 5 von hinten beleuchtet. Das optische Gitter 5 blendet das von der Lichtquelle einfallende Licht bis auf ein Hellgitter aus. Das Hellgitter wird von einem ersten Objektiv senkrecht auf die Oberfläche 2 projiziert. Hierbei bedeutet senkrecht, daß die optische Achse 7 des ersten Objektivs 6 senkrecht auf die Oberfläche 2 ausgerichtet ist. Das auf die Oberfläche 2 aufprojizierte Hellgitter wird von einem zweiten Objektiv 8 auf ein Dunkelgitter 9 abgebildet. Hierbei entspricht das zweite Objektiv 8 dem ersten Objektiv 6 und die optische Achse 10 des zweiten Objektivs 8 ist parallel zu der optischen Achse 7 des ersten Objektivs 6 ausgerichtet. Hinter dem Dunkelgitter 9 ist eine Feldlinse 11 angeordnet, mit deren Hilfe eine Kamera 12 von dem Dunkelgitter nicht ausgeblendete Lichtintensitäten des darauf abgebildeten Hellgitters registriert.

Die Vorrichtung 1 ist in dieser allgemeinen Form sowohl zur Durchführung bekannter Moire-Verfahren als auch zur Durchführung des neuen Verfahrens geeignet. Bei Durchführung des neuen Verfahrens ist das optische Gitter 5 und damit das hieraus resultierende Hellgitter in besonderer Weise ausgebildet und die Kamera 12 muß in der Lage sein, verschiedene optische Eigenschaften zu unterscheiden. In einer zweiten Ausführungsform der Vorrichtung ist zusätzlich hinter dem Dunkelgitter 9 ein Strahlteiler 13 vorgesehen, dem eine zweite Feldlinse 14 und eine zweite Kamera 15 zugeordnet sind. Diese zusätzlichen Bauteile sind hier gestrichelt wiedergegeben. Die Kamera 15 unterscheidet sich von der Kamera 12 in den optischen Eigenschaften der aufgezeichneten Lichtintensitäten.

Der Meßeffect bei einem Moire-Verfahren beruht auf der relativen Phasenverschiebung des auf das Dunkelgitter 9 abgebildeten Hellgitters, wobei das Dunkelgitter 9 und das Hellgitter etwa gleich große Gitterkonstanten aufweisen. Wird beispielsweise die Oberfläche 2 in die Stellung 2' verkippt, so resultiert hieraus bezüglich des Objektivs 8 eine vermeintliche Verschiebung des Hellgitters in Richtung der Pfeile 26 überall dort, wo sich die Oberfläche 2 auf das Objektiv 8 zu bewegt, und in Richtung der Pfeile 27 überall dort, wo sich die Oberfläche 2 von dem Objektiv 8 wegbewegt. Daraus ergeben sich lokale Veränderungen der Gitterkonstanten

des auf das Dunkelgitter abgebildeten Hellgitters, die in Form eines Linienmusters von der Kamera 12 beobachtet werden. Dabei ist normalerweise aus einem einzigen Linienmuster nicht zu unterscheiden, ob sich an einem bestimmten Punkt die Oberfläche 2 auf das Objektiv 8 zu bewegt oder sich von diesem entfernt. D. h., die Richtungen der Pfeile 26 und 27 sind bei stationärer Betrachtung der Oberfläche 2 nicht ermittelbar. Hier setzt die Erfindung an.

In Fig. 2 ist oben eine erste zur Durchführung der Erfindung geeignete Ausführungsform des optischen Gitters 5 gemäß Fig. 1 dargestellt. Darunter ist die entsprechende Ausführungsform des Dunkelgitters 9 wiedergegeben. Das optische Gitter 5 weist das einfallende Licht der Lichtquelle 3 vollständig ausblendende Schwarzbereiche 16 und dazwischen angeordnete Durchtritte 17 auf. Die Durchtritte sind dabei jeweils in zwei Bereiche 18, 19 mit unterschiedlichen optischen Eigenschaften aufgeteilt. Beispielsweise lassen die Bereiche 18 nur grünes und die Bereiche 19 nur rotes Licht hindurchtreten. Das Dunkelgitter 9 ist in einfallende Lichtintensitäten vollständig ausblendende Schwarzbereiche 20 und einfallende Lichtintensitäten vollständig hindurchtretende Durchtritte 21 aufgeteilt. Hierbei entspricht die Breite 22 der Durchtritte 21 der Breite 23 der Schwarzbereiche des optischen Gitters 5. Gleichzeitig gilt hier, daß die Breite 24 der Schwarzbereiche 20 des Dunkelgitters 9 genauso groß ist wie die Summe der Breiten 25 und 30 der beiden Bereiche 18 und 19 der Durchtritte 17 des optischen Gitters 5.

Das aus dem optischen Gitter 5 gemäß Fig. 2 resultierende Hellgitter besteht aussch. aus untereinander beabstandeten Streifen mit jeweils zwei parallelen Bereichen unterschiedlicher optischer Eigenschaften. Hierbei entsprechend die Streifen den Durchtritten 17 des optischen Gitters 5, die Abstände der Durchtritte den Schwarzbereichen 16 und die optischen Eigenschaften der beiden parallelen Bereichen denjenigen der Bereiche 18 und 19. Zur Veranschaulichung einer Verschiebung des auf das Dunkelgitter 9 abgebildeten Hellgitters können daher Relativverschiebungen des optischen Gitters 5 zu dem Dunkelgitter 9 betrachtet werden. Bereits aus Fig. 2 geht hervor, daß hierbei Relativverschiebungen in den unterschiedlichen Richtungen der Pfeile 26 und 27 zu unterschiedlichen Ergebnissen führen. So werden bei einer Verschiebung in Richtung des Pfeils 26 zuerst die Bereiche 19 von den Schwarzbereichen 20 des Dunkelgitters 9 abgedeckt, während in Richtung des Pfeils 27 zunächst die Bereiche 18 ausgeblendet werden.

Fig. 3 zeigt eine zweite Ausführungsform des optischen Gitters 5 und des Dunkelgitters 9 gemäß Fig. 1 zur Durchführung des neuen Moire-Verfahrens. Unterschiede zu der Ausführungsform gemäß Fig. 2 bestehen dabei hinsichtlich der Breite 23 der Schwarzbereiche 16 des optischen Gitters 5 und der Breite 22 der Durchtritte 21 des Dunkelgitters 9. Zwar stimmen auch hier diese beiden Größen überein, doch gleichen sie nicht der gesamten Breite der Durchtritte 17 des optischen Gitters 5 sondern jeweils nur einer der Breiten 25, 30 der einzelnen Bereiche 18, 19 der Durchtritte 17. Auf diese Weise wird eine stärkere Trennung der den Bereichen 18 und 19 bei dem Hellgitter entsprechenden parallelen Bereiche beim teilweisen Durchtritt durch das Dunkelgitter 9 bewirkt. Dies geht im einzelnen aus Fig. 4 hervor. Weiterhin ist die die Auflösung des Moire-Verfahrens bestimmende Gitterkonstante ($22 + 24$ bzw. $23 + 25 + 30$) um 25% kleiner als in Fig. 2, ohne daß eine der Breiten (22, 23, 24, 25, 30) kleiner wäre als die kleinste

Breite (25, 30) gemäß Fig. 2, die für den Herstellungsaufwand der Gitter entscheidend ist.

Fig. 4 zeigt drei verschiedene Auftragungen von Lichtintensitäten, die beim Verschieben des Hellgitters gegenüber dem Dunkelgitter 9 durch einen einzelnen Durchtritt 21 des Dunkelgitters 9 gemäß Fig. 1 hindurchtreten. Hierbei sind die Lichtintensitäten in einem relativen Maßstab wiedergegeben, während die Angabe zu den Verschiebungen den Phasenwinkel in Einheiten von π erfolgt. D. h. eine Verschiebung von 0 bis 2 entspricht der Relativverschiebung des Hellgitters gegenüber dem Dunkelgitter 9 um eine Periode, deren Länge sich aus den Breiten 23, 25 und 30 bzw. 24 und 22 zusammensetzt.

Fig. 4a gibt die Verhältnisse bei Verwendung eines herkömmlichen optischen Gitters 5 und eines daraus resultierenden herkömmlichen Hellgitters ohne Unterteilung der Streifen in parallele Bereiche unterschiedlicher optischer Eigenschaften wieder. Hierbei ist eine Verschiebung in positiver Richtung, die dem Pfeil 26 gemäß Fig. 1 entspricht, nicht von einer Verschiebung in der negativen Richtung des Pfeils 27 zu unterscheiden. Der Verlauf der dargestellten Lichtintensität 31 weist dieselbe Symmetrie zum Nullpunkt auf wie das optische Gitter 5 bzw. das daraus resultierende Hellgitter.

In Fig. 4b, die der Verwendung eines optischen Gitters und eines Dunkelgitters 9 gemäß Fig. 2 entspricht, ist diese Symmetrie nicht gegeben. Die gesamte Lichtintensität weist zwei unterscheidbare Anteile 28 und 29 auf. Der Anteil 28 geht jeweils auf einen Bereich 18 der Durchtritte des optischen Gitters 5 zurück, während der Anteil 29 auf einem Bereich 19 beruht. Beide Anteile 28 und 29 sind asymmetrisch zum Nullpunkt verteilt. D. h. es gilt $I_{28}(-x)$ ungleich $I_{28}(x)$ und $I_{29}(-x)$ ungleich $I_{29}(x)$. Auch bei beliebiger Wahl des Nullpunkts ergibt sich höchstens für einen Anteil eine symmetrische Verteilung. Dies ist Grundlage dafür, daß sich Verschiebungen des Hellgitters in Richtung des Pfeils 26 von solchen in Richtung des Pfeils 27 unterscheiden lassen. Bei Verschiebungen des Hellgitters in Richtung des Pfeils 26 nimmt zunächst die Lichtintensität des Bereichs 19 ab, während die des Bereichs 18 auf dem Maximalwert bleibt. Bei Verschiebung in Richtung des Pfeils 27 ist genau das Umgekehrte der Fall. Darüber hinaus ist aus Fig. 4b ersichtlich, daß die Flanken der Anteile 28 und 29 doppelt so steil sind wie diejenigen der in Fig. 4a aufgetragenen Lichtintensität 31. Hieraus ergibt sich eine verbesserte Auflösung des Moire-Verfahrens, die einem Gitter mit halbierten Periodenlänge, was gleichbedeutend ist mit einem Gitter doppelter Gitterkonstante, entspricht.

Die in Fig. 4c dargestellten Verläufe der Anteile 28 und 29 an den durch einen einzelnen Durchtritt 21 des Dunkelgitters 9 hindurchtretenden Lichtintensitäten geht auf die Verwendung des optischen Gitters 5 und des Dunkelgitters 9 gemäß Fig. 3 zurück. Hierbei entspricht der Nullpunkt genau der in Fig. 3 wiedergegebenen Relativstellung. Bei der Skalierung des Phasenwinkels π ist die relativ zu Fig. 2 kleinere Gitterkonstante ($22 + 24$ bzw. $23 + 25 + 30$) berücksichtigt. Wie bereits erwähnt führt die Ausführungsform gemäß Fig. 3 zu einer stärkeren Trennung der Lichtintensitäten der beiden parallelen Bereiche der Streifen des auf das optische Gitter 5 zurückgehenden Hellgitters. Dies ist daran ersichtlich, daß die Kurvenflächen unter den Anteilen 28 und 29 eine geringere Überdeckung aufweisen als in Fig. 4b. Allerdings werden bei beiden Anteilen 28 und

29 so nur in einem geringen Teilbereich leicht registrierbare große Lichtintensitäten von dem Dunkelgitter 9 durchgelassen. Die jeweiligen Flankensteigungen sind wie bei der Ausführungsform gemäß Fig. 4a gegenüber dem Stand der Technik auf das Doppelte angestiegen. Dies bedeutet wiederum eine Verbesserung der Auflösung des Moire-Verfahrens um 100%. Ebenso ist natürlich auch hier aus dem asymmetrischen Aufbau des optischen Gitters 5 bzw. des daraus resultierenden Hellgitters und der asymmetrischen Verteilung der Anteile 28 und 29 die jeweilige Verschiebungsrichtung ermittelbar. So sind wie in Fig. 4b Verschiebungen in Richtung des Pfeils 26 dadurch charakterisiert, daß sich an einen dunklen Bereich zunächst eine Linie des Anteils 29 und dann eine des Anteils 28 anschließt, während Verschiebungen in Richtung des Pfeils 27 durch eine Reihenfolge dunkler Bereiche, Anteil 28 und Anteil 29 erkenntlich sind.

Fig. 5 zeigt die Verteilung der Lichtintensität 32 auf der Rückseite des Dunkelgitters 9 bei Anordnung der Oberfläche 2 in Stellung 2' oder 2''. Die lokalen Maxima und Minima der Lichtintensität 32 entsprechen dabei jeweils Durchtritten 21 und Schwarzbereichen 20 des Dunkelgitters 9. Die Minima und Maxima einer geglätteten Intensität 33, die hier die Maxima der Lichtintensität 32 miteinander verbindet, entsprechen Höhenlinien auf der Oberfläche 2, die in Fig. 1 senkrecht zur Zeichenebene verlaufen. Aus Fig. 5 ist nun aber noch nicht ersichtlich, ob die Höhenlinien einer ansteigenden Kontur, einer abfallenden Kontur oder einer Wölbung bzw. einer Vertiefung entsprechen. Dies ergibt sich erst, wenn die Lichtintensität 32 für beide Bereiche 18 und 19 der Durchtritte des optischen Gitters 5 bzw. der entsprechenden Bereiche des Hellgitters separat aufgetragen und die jeweiligen Abfolgen der Anteile 28 und 29 bei den lokalen Maxima ermittelt werden. Gleiche Abfolgen bedeuten dann gleichsinnig ansteigende oder abfallende Höhenlinien, wobei jedoch in dem Bereich zwischen den optischen Achsen 7 und 10 der Objektive 6 und 8 gemäß Fig. 1 ein Vorzeichenwechsel auftritt.

Bezugszeichenliste

- 1 Vorrichtung
- 2 Oberfläche
- 3 Lichtquelle
- 4 Linse
- 5 optisches Gitter
- 6 Objektiv
- 7 optische Achse
- 8 Objektiv
- 9 Dunkelgitter
- 10 Optische Achse
- 11 Feldlinse
- 12 Kamera
- 13 Strahlteiler
- 14 Feldlinse
- 15 Kamera
- 16 Schwarzbereich
- 17 Durchtritt
- 18 Bereich
- 19 Bereich
- 20 Schwarzbereich
- 21 Durchtritte
- 22 Breite
- 23 Breite
- 24 Breite
- 25 Breite

- 26 Pfeil
- 27 Pfeil
- 28 Anteil
- 29 Anteil
- 30 Breite
- 31 Lichtintensität
- 32 Lichtintensität
- 33 geglättete Intensität

Patentansprüche

1. Moire-Verfahren zum Vermessen einer Oberfläche, bei dem ein periodisches Hellgitter auf die Oberfläche projiziert wird, das auf die Oberfläche aufprojizierte Hellgitter auf ein Dunkelgitter abgebildet wird, das eine gleichgroße Gitterkonstante wie das darauf abgebildete Hellgitter aufweist, und bei dem eine Verteilung von durch das Dunkelgitter hindurchtretenden Lichtintensitäten des darauf abgebildeten Hellgitters ausgewertet wird, dadurch gekennzeichnet, daß das Hellgitter asymmetrisch ausgebildet ist.
2. Moire-Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß das Hellgitter Streifen mit jeweils zwei unterschiedlichen Flanken aufweist.
3. Moire-Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß das Hellgitter Streifen mit jeweils zwei parallelen Bereichen unterschiedlicher Farbe aufweist.
4. Moire-Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß das Hellgitter Streifen mit jeweils zwei parallelen Bereichen unterschiedlicher Polarisation aufweist.
5. Moire-Verfahren nach Anspruch 3 oder 4, dadurch gekennzeichnet, daß die beiden parallelen Bereiche gleiche Breite (25, 30) aufweisen.
6. Moire-Verfahren nach einem der Ansprüche 2 bis 5, dadurch gekennzeichnet, daß das Dunkelgitter (9) streifenförmige, darauf abgebildete Lichtintensitäten des Hellgitters vollständig ausblendende Schwarzbereiche (20) aufweist, deren Breite (24) genauso groß ist wie die Breite (25 + 30) der Streifen des Hellgitters.
7. Moire-Verfahren nach einem der Ansprüche 3 bis 6, dadurch gekennzeichnet, daß das Dunkelgitter (9) streifenförmige, darauf abgebildete Lichtintensitäten des Hellgitters vollständig ausblendende Schwarzbereiche (20) aufweist, deren Abstand (22) genauso groß ist wie die Breite (25 + 30) der Streifen des Hellgitters.
8. Moire-Verfahren nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, daß das Dunkelgitter (9) streifenförmige, darauf abgebildete Lichtintensitäten des Hellgitters vollständig ausblendende Schwarzbereiche (20) aufweist, deren Abstand (22) genauso groß ist wie die Breite (25, 30) jedes parallelen Bereichs der Streifen des Hellgitters.
9. Vorrichtung zur Durchführung des Moire-Verfahrens nach einem der voranstehenden Ansprüche 1 bis 8, mit einem einfallendes Licht bis auf ein Hellgitter ausblendenden, optischen Gitters, einer das optische Gitter von hinten beleuchtenden Lichtquelle, einem das Hellgitter auf eine Oberfläche projizierenden ersten Objektiv, einem das auf die Oberfläche aufprojizierte Hellgitter auf ein Dunkelgitter abbildenden und parallel zu dem ersten Objektiv ausgerichteten zweiten Objektiv und mit einer von dem Dunkelgitter nicht ausgeblende-

te Lichtintensitäten des darauf abgebildeten Hellgitters registrierenden Kamera, dadurch gekennzeichnet, daß das optische Gitter (5) in jeweils zwei Bereiche (18, 19) mit unterschiedlichen optischen Eigenschaften aufgeteilte Durchtritte (17) aufweist 5 und daß die Kamera (12) die optischen Eigenschaften der beiden Bereiche (18, 19) unterscheidet oder im Strahlengang hinter dem Dunkelgitter ein Strahlteiler (13) und eine zweite Kamera (15) angeordnet sind, wobei die beiden Kameras (12, 15) jeweils Lichtintensitäten mit den optischen Eigenschaften eines der beiden Bereiche (18, 19) registrieren. 10

10. Vorrichtung nach Anspruch 9, dadurch gekennzeichnet, daß das optische Gitter (5) eine fotografische Wiedergabe einer farbigen Vorlage ist. 15

Hierzu 5 Seite(n) Zeichnungen

20

25

30

35

40

45

50

55

60

65

- Leerseite -

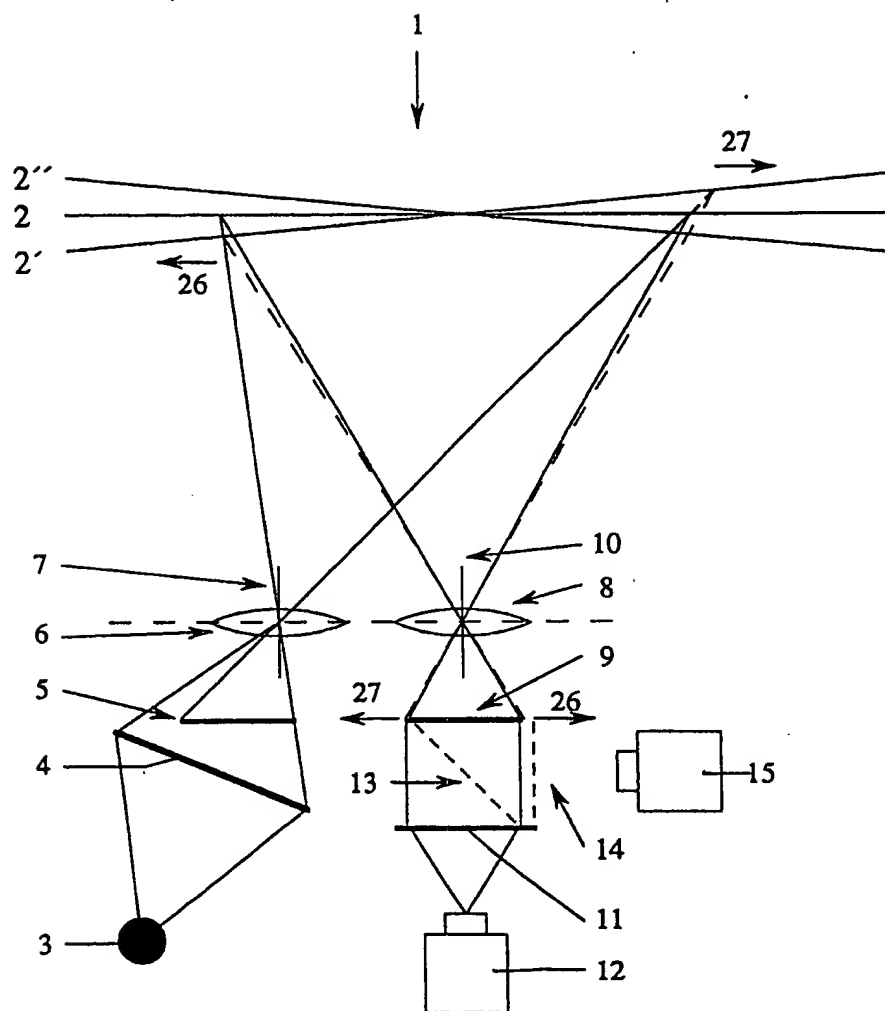


Fig. 1

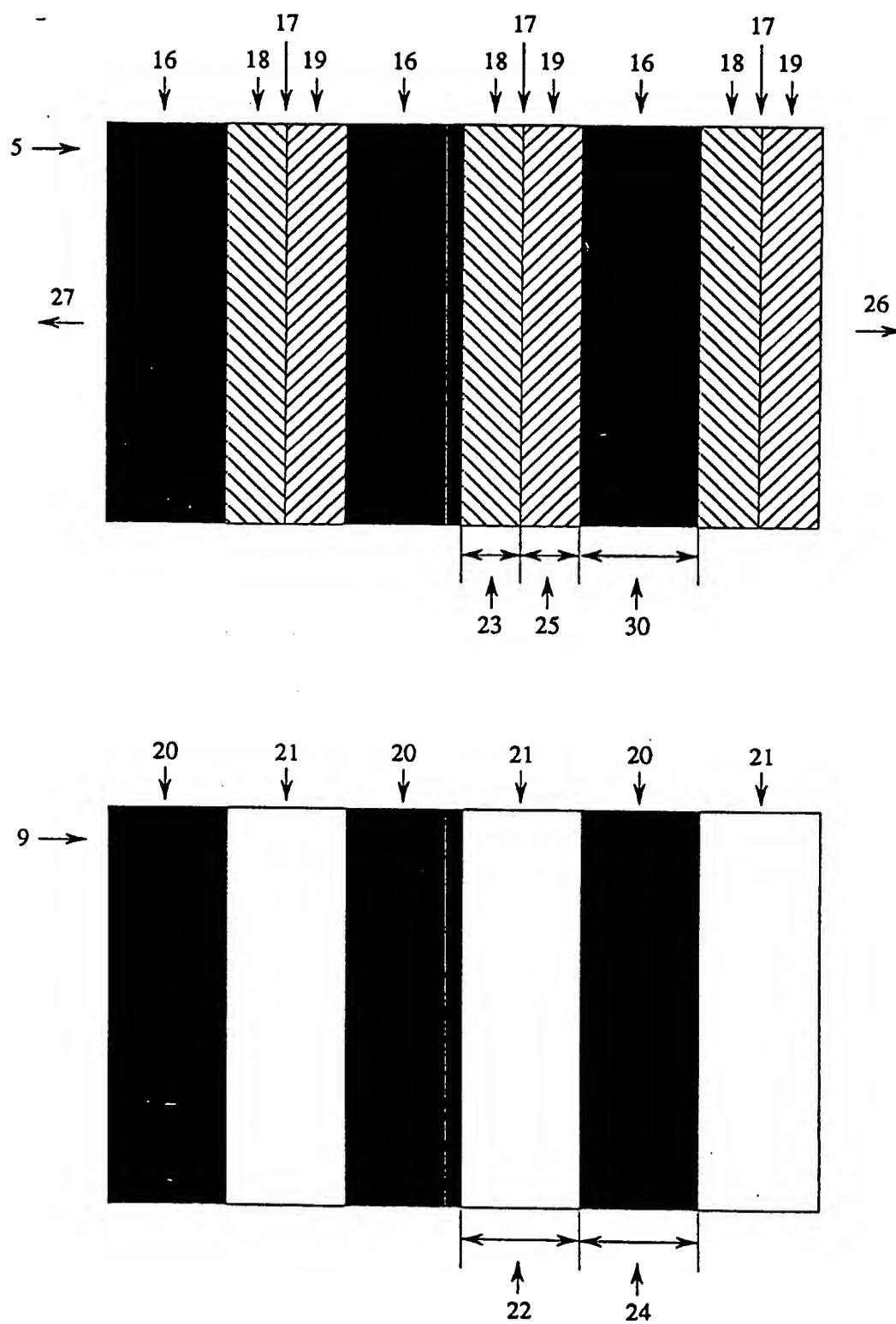


Fig. 2

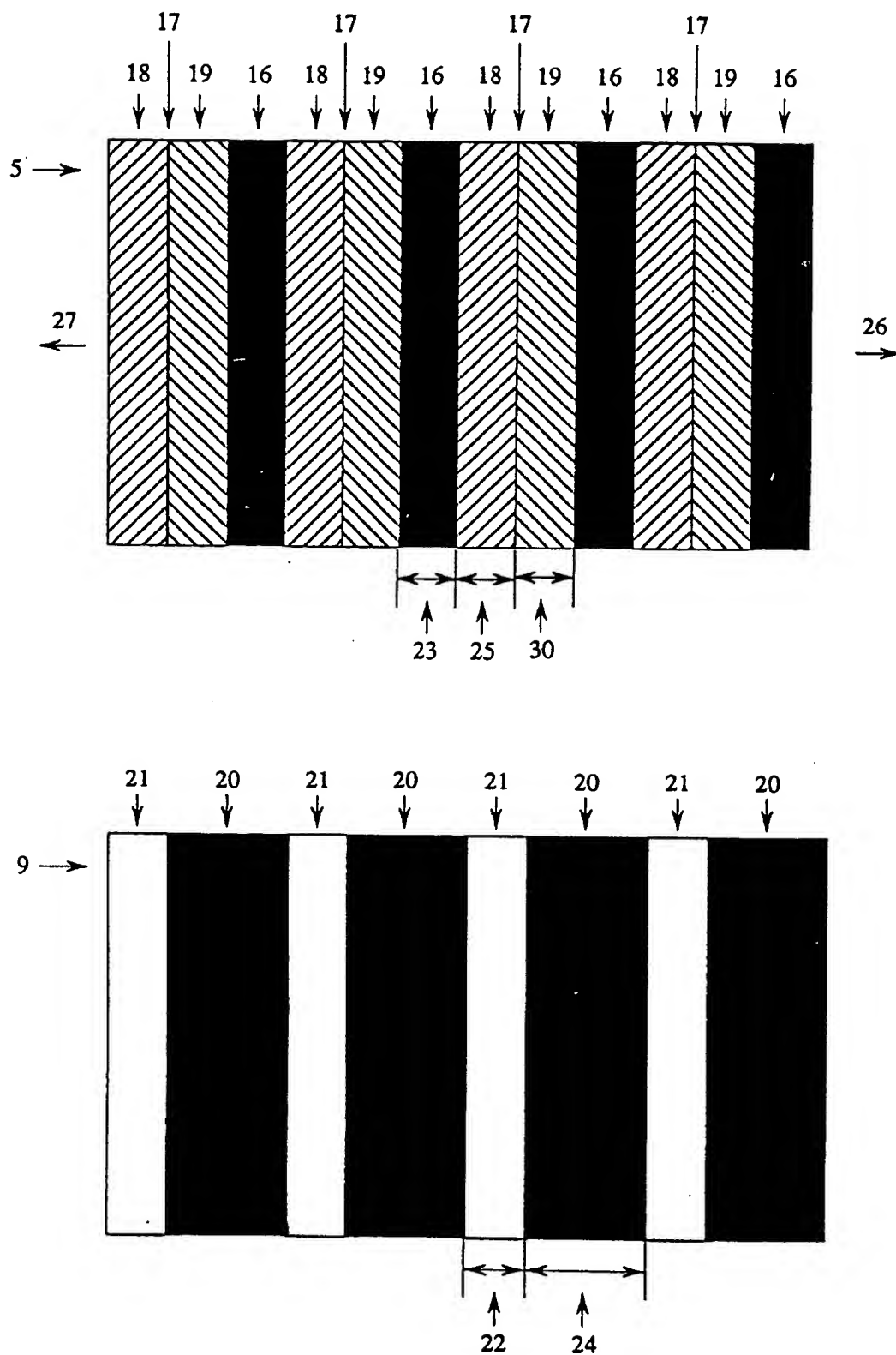


Fig. 3

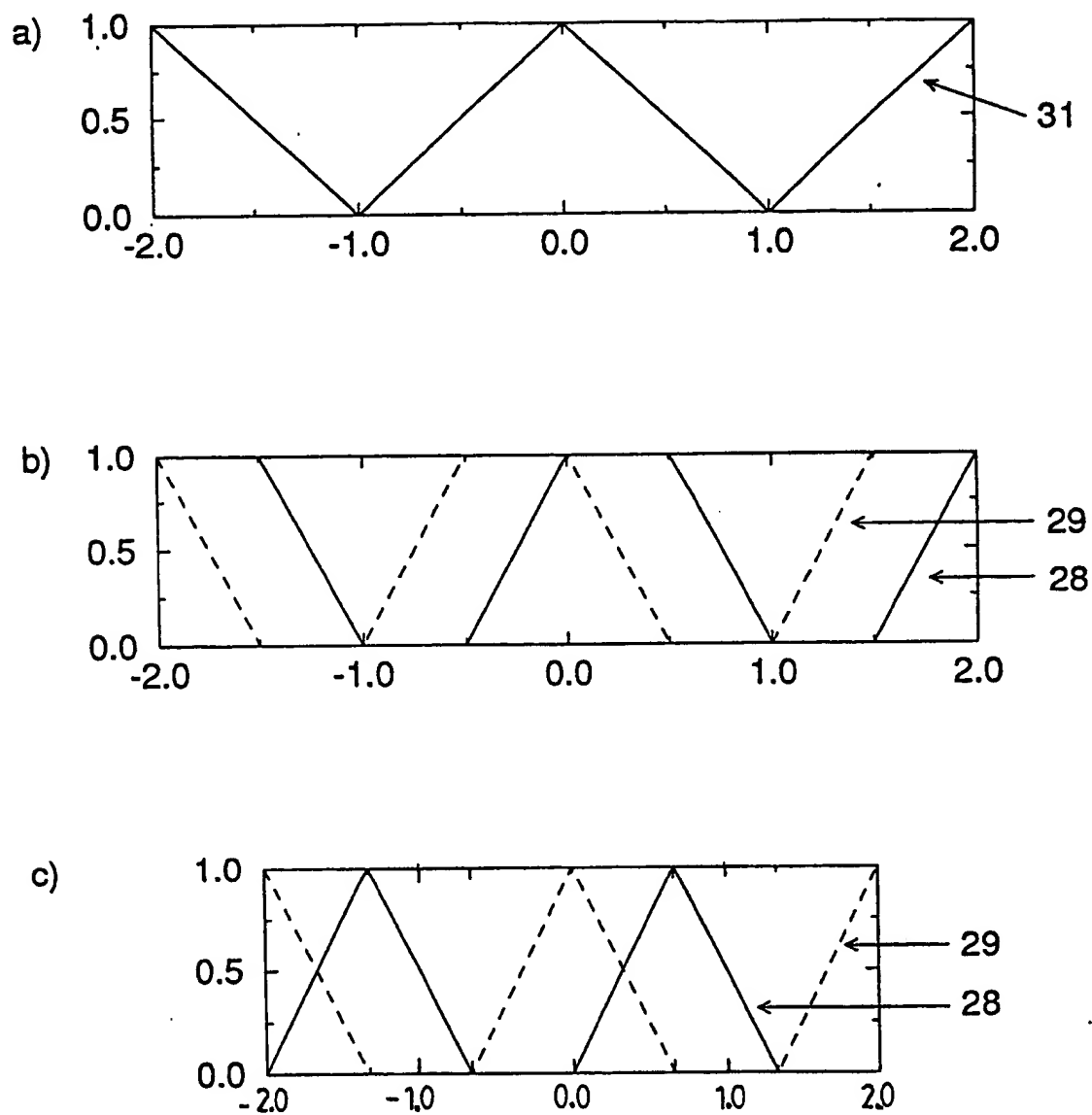


Fig. 4

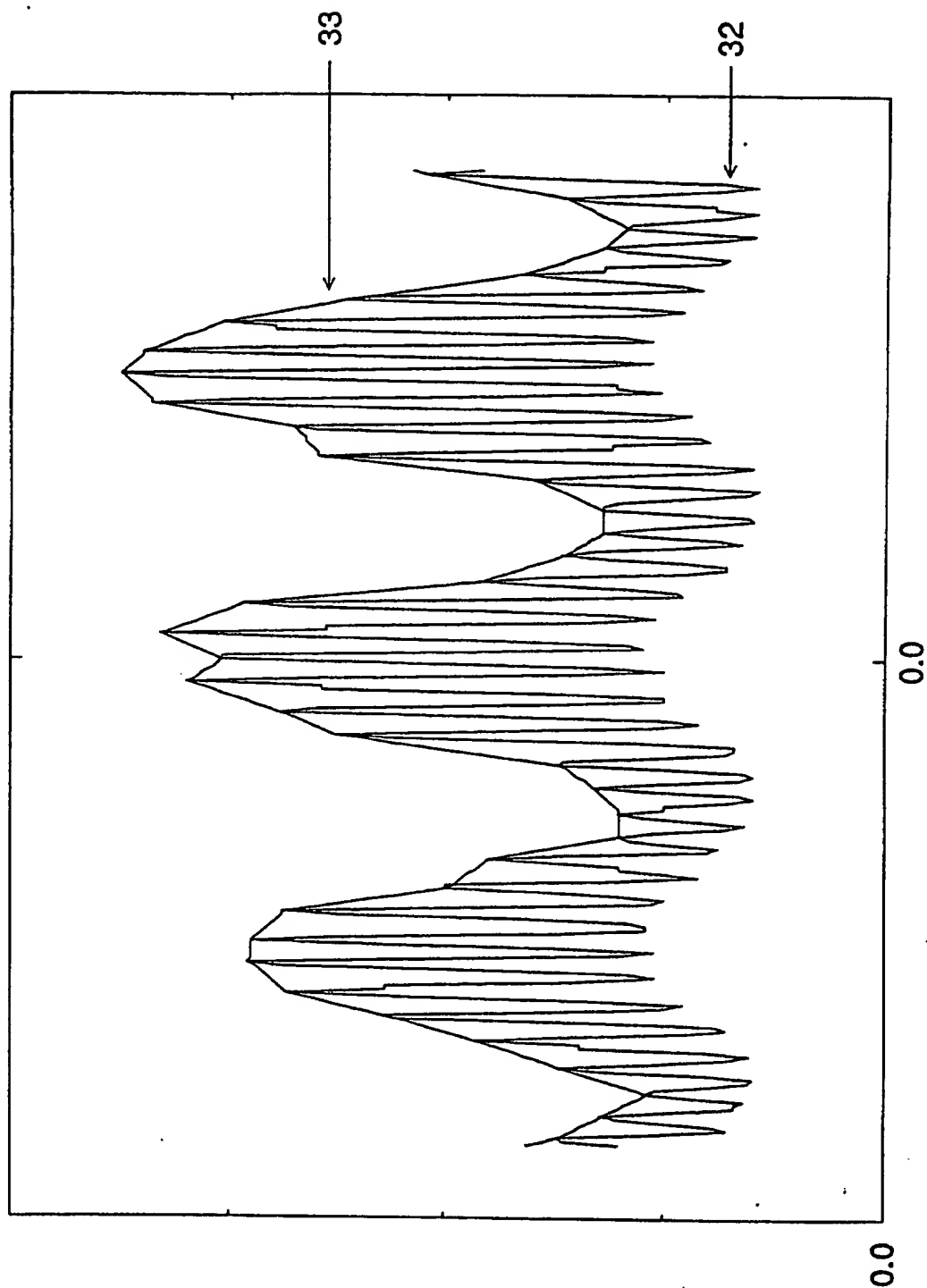


Fig. 5

TRANSLATION:

(19) Federal Republic of Germany – German Patent Office

(12) Offenlegungsschrift

EARLY DISCLOSURE
[Unexamined Patent Application]

(10) Document No.: DE 42 30 108 A1

(51) Intl. Cl.⁵: G 01 B 11/30
G 01 C 11/00
G 02 B 27/60

(21) File No.: P 42 30 108.4

(22) Application Date: September 9, 1992

(43) Early Disclosure Date: March 10, 1994

(71) Applicant(s): Deutsche Forschungsanstalt für Luft- und
Raumfahrt e.V.
53127 Bonn, DE

(72) Inventor(s): Baumann, Peter Helmut, Graduate Physicist
3400 Göttingen, DE

Petition for examination pursuant to § 44 of the Patent Law has been filed.

(54) Title of the Invention:

MOIRÉ METHOD AND DEVICE FOR MEASURING A SURFACE

(57) Abstract:

In a moiré method for measuring a surface (2), a periodic light grating is projected onto the surface. The light grating projected onto the surface (2) is imaged onto a shadow grating (9), which has approximately the same grating constant as the light grating imaged onto it. The distribution of light intensities of the light grating imaged onto the shadow grating (9), which

pass through the shadow grating (9), is evaluated. The light grating is asymmetrically formed.

The following information is derived from documents submitted by the applicant.

Federal Printing Office 01. 94 308 070/470 12/42

SPECIFICATION

The invention concerns a moiré method for measuring a surface, in which a periodic light grating is projected onto the surface, the light grating projected onto the surface is imaged onto a shadow grating, which has the same grating constant as the light grating imaged onto it, and the distribution of light intensities of the light grating imaged onto the shadow grating, which pass through the shadow grating, is evaluated. The invention also concerns a device for carrying out the moiré method.

In a conventional moiré method, a ruled grating is illuminated from behind by a light source, such that the ruled grating blocks out the incident light except for a light grating. This light grating is projected by a first objective onto the surface to be measured. The light grating projected onto the surface is imaged onto a shadow grating by a second objective. The shadow grating corresponds here, even if the two objectives coincide, to the optical grating, i.e., it has the same or at least almost the same grating constant as the light grating imaged onto it. Light intensities of the light grating imaged onto the shadow grating which are not blocked out by the shadow grating are recorded by a camera. A line pattern appears, which in the ideal case of identical grating constants directly corresponds to contour lines on the surface to be measured. For the quantitative analysis of these contour lines, the two objectives must be oriented parallel to each other and essentially perpendicularly to the surface to be measured. The advantages of

the moiré method are that no special preparation of the surface to be measured is necessary, that the measurement of the surface occurs without contact and is also possible from a great distance, that a two-dimensional image of the contour of the surface is obtained, and that the accuracy of the measurement is relatively great compared to the distance from the surface maintained during the measurement. However, a disadvantage of the method is that the direction of the contours of the surface cannot be derived from the recorded light intensities, i.e., that, for example, a convexity of the surface cannot be distinguished from a corresponding depression.

The article “Automatic on-line measurements of 3-D shape by shadow casting Moiré topography” (Reid et al., *Wear*, Vol. 109, pp. 297-304 (1986)) discloses a moiré method, in which, after a particular phase shift of one of the gratings, at least three line patterns on the surface to be measured are recorded. The directions of contours of the surface can then also be determined from the phase shift of the gratings and the individual line patterns. However, this is relatively complicated.

The article “Phase shift method based on object translation for full field automatic 3-D surface reconstructions from Moiré topograms (Dirckx et al., *Applied Optics*, Vol. 27, No. 6, pp. 1,164-1,169 (1988)) discloses a moiré method for the measurement of surfaces, in which the surface is subjected to a translation between the recording of individual line patterns. Here too, a total of at least three line patterns must be recorded if the directions of contours on the surface are to be determined. The evaluation of the individual line patterns also turns out to be difficult. Another basic consideration here is that aperiodic processes, during which the surface is to be measured, do not allow repeated recording of line patterns in the same position of the surface.

The objective of the invention is to specify a moiré method and a device for carrying it out, with which the evaluation of a single line pattern is sufficient for determining the direction

of the contours on the surface.

In accordance with the invention, this objective is achieved by forming the light grating asymmetrically. The asymmetry of the light grating makes it possible to recognize the direction in which a contour of the surface is running, i.e., the asymmetry of the light grating reveals whether an inclination of the surface is directed away from or towards the gratings. The light gratings for carrying out state-of-the-art moiré methods all obey the condition $I(n \times c - x) = I(n \times c + x)$. The light intensity I thus not only shows a periodic distribution with a grating constant c , but also it is arranged symmetrically with respect to its center $n \times c$ within each period. By contrast, in the invention, $I(n \times c - x) \neq I(n \times c + x)$, at least for a finite number of points. In this way, the direction of the phase shift of the light grating relative to the shadow grating can be recognized in the line pattern. However, in the direction of the phase shift, it is precisely the inclinations of the surface to be measured that are directed towards the gratings and away from the gratings which also differ.

The above requirement $I(n \times c - x) \neq I(n \times c + x)$ is consistent, in its simplest interpretation, with the fact that the light grating has strips with two different sidepieces each. However, the directions of the contours of the surface are more easily distinguished if the light grating has strips with two parallel zones of different colors. In this case, $I(n \times c - x) \neq I(n \times c + x)$ at least for one of the two colors if the origin of x is chosen to be the same for both colors. The directions of the contours of the surface can then be distinguished by one time first observing a line of the first color and only then a line of the second color, while another time the order of the colors of the lines is just the opposite.

Different colors of the two parallel strips correspond to zones, which, to be sure, have the same color, but have different polarizations. Here, of course, the direction of the contours is not

immediately apparent without technical aids, and the evaluation of the line pattern requires a device that is capable of detecting the different polarizations of the light intensities passing through the shadow grating.

It is advantageous for the two parallel zones of the strips of the light grating to have the same width. In this case, only the sequence of colors or polarizations is dependent on the direction of inclination of the surface, but not additionally the distance between the individual observed lines.

The shadow grating may have strip-like black zones that completely block out light intensities of the light grating imaged onto it, whose width is the same as that of the strips of the light grating. Basically, both the intensities of the light grating and the transparencies of the shadow grating may have continuous, e.g., sinusoidal, courses. However, the line patterns are quantitatively easier to evaluate if 1-0 gratings are used, i.e., gratings which locally have either no intensity or maximum intensity or no transparency or maximum transparency. In this regard, to completely utilize the information contained in the phase shift of the shadow grating and of the light grating imaged onto it, it makes sense to select the distance between the black zones that block out the light intensities of the light grating imaged onto it, to be the same size as the width of the strips of the light grating.

In another advantageous embodiment, the shadow grating has black zones that completely block out strip-like light intensities of the light grating imaged onto it, which are separated by distances exactly the same size as the width of each parallel zone of the strips of the light grating. Here, the intensity distributions of the individual colors or polarizations are already more strongly separated by the shadow grating. This facilitates the evaluation of the line patterns in individual cases.

In accordance with the invention, a device for carrying out the new moiré method, which has an optical grating that blocks out incident light except for a light grating; a light source that illuminates the optical grating from behind; a first objective that projects the light grating onto the surface; a second objective, which is oriented parallel to the first objective and images the light grating projected onto the surface onto a shadow grating; and a camera that records the light intensities of the light grating imaged onto the shadow grating which are not blocked out by the shadow grating; is characterized by the fact that the optical grating has openings that are each divided into two zones with different optical properties, and that the camera distinguishes the optical properties of the two zones. Instead of the one camera that distinguishes the optical properties of the two zones, a beam splitter may also be arranged in the beam path behind the shadow grating, which splits the light intensities passing through the shadow grating into two split beams. Separate cameras are then arranged in the two split beams, each of which records the light intensities with the optical properties of one of the two zones. In the simplest case, the openings of the optical grating have two zones of different colors, and color film is loaded in the camera to record the light intensity. However, in the case of computer-aided evaluation of the light intensities, it may often be advantageous to separately record the light intensities with the optical properties of one of the two zones right from the beginning. This can be done with two different cameras with the use of a beam splitter. However, the use of one color camera may be especially simple with respect to the required adjustment work.

The optical grating can be produced in an advantageous way by photographing a colored pattern. This makes it possible to split the openings of the optical grating into two zones of different color and nevertheless obtain small grating constants. The grating constants directly determine the resolution during measurement of the surface. In this connection, it is worth

mentioning that the new method and the new device make it possible to improve the effective grating constant by a factor of up to 2 by splitting the strips of the light grating or the openings of the optical grating into two zones arranged parallel to each other, i.e., with a favorable design, the colored light grating corresponds to a normal grating with the strips separated by a distance half as great.

The invention is described and explained in greater detail below with reference to specific embodiments.

-- Figure 1 shows a device for carrying out the moiré method.

-- Figure 2 shows a light grating and a shadow grating for use with a first embodiment of the moiré method.

-- Figure 3 shows a light grating and a shadow grating for carrying out a second embodiment of the moiré method.

-- Figure 4 shows intensity plots in various embodiments of the moiré method.

-- Figure 5 shows a line pattern in two-dimensional cross section obtained in a performance of the moiré method.

The device shown in Figure 1 is used for carrying out a moiré method for measuring a surface. The purpose here is to determine the contour of the surface. The tilting of the surface 2 into positions 2' and 2" serves here as an example of the inclination of the surface 2 within its contour. The device 1 has a light source 3, which illuminates an optical grating 5 from behind through an interposed lens 4. The optical grating 5 blocks out the incident light from the light source except for a light grating. The light grating is projected perpendicularly onto the surface 2 by a first objective. In this regard, perpendicularly means that the optical axis 7 of the first objective is oriented perpendicularly to the surface 2. The light grating projected onto the

surface 2 is imaged onto a shadow grating 9 by a second objective 8. The second objective 8 matches the first objective 6, and the optical axis 10 of the second objective 8 is oriented parallel to the optical axis 7 of the first objective 6. A field lens 11 arranged behind the shadow grating 6 [sic; *should be "9"* -- Tr. Ed.] helps a camera 12 record the light intensities of the light grating imaged on the shadow grating which are not blocked out by the shadow grating.

The device 1 in this general form is suitable both for carrying out previously known moiré methods and for carrying out the new method. In carrying out the new method, the optical grating 5 and thus the light grating resulting from it are formed in a special way, and the camera 12 must be capable of distinguishing different optical properties. In a second embodiment of the device, a beam splitter 13 is additionally provided behind the shadow grating 9, and a second field lens 14 and a second camera 15 are assigned to the beam splitter 13. These additional components of the system are indicated here by broken lines. The camera 15 differs from the camera 12 in the optical properties of the recorded light intensities.

The measuring effect in a moiré method is based on the relative phase shift of the light grating imaged onto the shadow grating 9, and the shadow grating 9 and the light grating have approximately the same grating constant. If, for example, the surface 2 is tilted into the position 2', this results, relative to the second objective 8, in a presumed shift of the light grating in the directions indicated by the arrows 26 wherever the surface 2 is moving towards the objective 8 and in the directions indicated by the arrows 27 wherever the surface 2 is moving away from the objective 8. This results in local changes in the grating constants of the light grating imaged onto the shadow grating, which are observed by the camera 12 in the form of a line pattern. In this regard, it is not normally possible to distinguish on the basis of a single line pattern whether the surface 2 is moving towards or away from the objective 8 at a specific point. In other words, the

directions of the arrows 26 and 27 cannot be determined in the case of stationary observation of the surface 2. This is where the invention comes in.

A first embodiment of the optical grating 5 according to Figure 1, which is suitable for carrying out the method of the invention, is shown at the top of Figure 2. The corresponding embodiment of the shadow grating 9 is shown at the bottom. The optical grating 5 has black zones 16 that completely block out the incident light of the light source 3 and openings 17 arranged between them. The openings are each divided into two zones 18, 19 with different optical properties. For example, the zones 18 allow only green light to pass, and the zones 19 allow only red light to pass. The shadow grating 9 is divided into black zones 20 that completely block out incident light intensities and openings 21 that allow complete passage of incident light intensities. The width 22 of the openings 21 corresponds to the width 23 of the black zones of the optical grating 5. At the same time, the width 24 of the black zones 20 of the shadow grating 9 is exactly the same size as the sum of the widths 25 and 30 of the two zones 18 and 19 of the openings 17 of the optical grating 5. *[Although the last two sentences seem absurd, they are actually correct. It is the labeling in Figure 2 which is incorrect. See the second paragraph following, which indicates that Figure 2 is mislabeled; the three widths labeled 23, 25, and 30 should all be moved over one zone to the left, so that 23 falls below the black zone 16, and 25, 30 fall below the zones 18, 19. This is most evident from the statement in the last sentence of the second paragraph below that the smallest widths in Figure 2 are 25 and 30. Everything is correctly labeled in Figure 3. -- Tr. Ed.]*

The light grating resulting from the optical grating 5 according to Figure 2 consists exclusively of spaced strips, each of which has two parallel zones of different optical properties. In this regard, the strips correspond to the openings 17 of the optical grating 5, the distances

between the openings correspond to the black zones 16, and the optical properties of the two parallel zones correspond to those of the zones 18 and 19. Therefore, to illustrate a shift of the light grating imaged on the shadow grating 9, relative shifts of the optical grating 5 to the shadow grating 9 can be considered. It is already apparent from Figure 2 that relative shifts in the different directions of the arrows 26 and 27 lead to different results. Thus, when a shift occurs in the direction of arrow 26, the zones 19 are covered first by the black zones 20 of the shadow grating 9, whereas when a shift occurs in the direction of arrow 27, the zones 18 are blocked out first.

Figure 3 shows a second embodiment of the optical grating 5 and the shadow grating 9 according to Figure 1 for carrying out the new moiré method. In this regard, differences from the embodiment according to Figure 2 exist with respect to the width 23 of the black zones 16 of the optical grating 5 and the width 22 of the passage 21 of the shadow grating 9. Although these two widths are also the same here, they do not equal the total width of the openings 17 of the optical grating 5, but rather each is equal to only one of the widths 25, 30 of the individual zones 18, 19 of the opening 17. This results in stronger separation of the parallel zones corresponding to the zones 18 and 19 in the light grating during partial passage through the shadow grating 9. This is shown in detail in Figure 4. In addition, the grating constant ($22 + 24$ and $23 + 25 + 30$), which determines the resolution of the moiré method, is 25% smaller than in Figure 2, without one of the widths (22, 23, 24, 25, 30) being smaller than the smallest width (25, 30) according to Figure 2, which is critical with respect to the production expense of the gratings.

Figure 4 shows three different plots of light intensities, which pass through an individual opening 21 of the shadow grating according to Figure 1, when the light grating is shifted relative to the shadow grating 9. In this regard, the light intensity values are plotted on a relative scale,

while the phase angle shift is plotted in units of π , i.e., a shift from 0 to 2 corresponds to the relative shift of the light grating relative to the shadow grating 9 by one period, whose length is composed of the widths 23, 25 and 30 or 24 and 22.

Figure 4a shows the conditions with the use of a conventional optical grating 5 and a conventional light grating resulting from it without dividing the strips into parallel zones of different optical properties. In this case, a shift in the positive direction, which corresponds to the arrow 26 in Figure 1, cannot be distinguished from a shift in the negative direction, which corresponds to the arrow 27. The plot of the light intensity 31 has the same symmetry to the origin as the optical grating 5 and the light grating resulting from it.

In Figure 4b, which corresponds to the use of an optical grating and a shadow grating 9 in accordance with Figure 2, this symmetry is not present. The total light intensity has two distinguishable components 28 and 29. The component 28 originates from a zone 18 of the openings of the optical grating 5, while the component 29 is due to a zone 19. Both components 28 and 29 are distributed asymmetrically to the origin, i.e., $I_{28}(-x) \neq I_{28}(x)$ and $I_{29}(-x) \neq I_{29}(x)$. Even in the case of arbitrary choice of the origin, a symmetrical distribution can be obtained for only one component at most. This is the basis for the fact that shifts of the light grating in the direction of arrow 26 can be distinguished from shifts in the direction of arrow 27. In the case of shifts of the light grating in the direction of arrow 26, the light intensity of the zone 19 starts to decrease, while the light intensity of zone 18 remains at its maximum value. When the shift occurs in the direction of arrow 27, exactly the opposite change occurs. Moreover, Figure 4b shows that the flanks of the components 28 and 29 are twice as steep as the flanks of the light intensity 31 plotted in Figure 4a. This means that the moiré method has improved resolution, which corresponds to a grating with half the period length, which is equivalent to a grating that

has a grating constant twice as large.

The plots shown in Figure 4c of the components 28 and 29 of the light intensities passing through a single opening 21 of the shadow grating 9 are based on the use of the optical grating 5 and shadow grating 9 shown in Figure 3. The origin here corresponds exactly to the relative position shown in Figure 3. The scaling of the phase angle π takes into account the smaller grating constant relative to Figure 2 (22 + 24 and 23 + 25 + 30). As was mentioned earlier, the embodiment in accordance with Figure 3 results in a stronger separation of the light intensities of the two parallel zones of the strips of the light grating originating from the optical grating 5. This is apparent from the fact that there is less overlap of the areas under the curves of components 28 and 29 than in Figure 4b. Of course, this means that in the case of both components 28 and 29, easily recordable large light intensities are allowed to pass by the shadow grating 9 only in a small partial region. As in the embodiment in accordance with Figure 4a [*sic; should be "4b" -- Tr. Ed.*], the flank slopes of each component are twice as steep as in the state of the art [*Figure 4a is the state of the art; Figure 4b is the embodiment in accordance with Figure 2 -- Tr. Ed.*]. This again means an improvement in the resolution of the moiré method of 100%. Here again, of course, the given shift direction can be determined from the asymmetrical structure of the optical grating 5 and of the light grating that results from it and from the asymmetrical distribution of the components 28 and 29. Thus, as in Figure 4b, shifts in the direction of arrow 26 are characterized by the fact that a dark zone is followed first by a line of component 29 and then by a line of component 28, while shifts in the direction of arrow 27 can be recognized by a sequence in which a dark zone is followed by component 28 and then component 29.

Figure 5 shows the distribution of the light intensity 32 on the back side of the shadow

grating 9 when the surface 2 is positioned in position 2' or 2". The local maxima and minima of the light intensity 32 correspond here to openings 21 and black zones 20 of the shadow grating 9. The minima and maxima of a smoothed intensity 33, which connects the maxima of the light intensity 32 with one another, correspond to contour lines on the surface 2, which run perpendicularly to the plane of the drawing in Figure 1. However, it is not yet apparent from Figure 5 whether the contour lines correspond to a rising contour, a falling contour or a convexity or depression. This information is not obtained until the light intensities 32 for the two zones 18 and 19 of the openings of the optical grating 5 and the corresponding zones of the light grating are separately plotted, and the respective sequences of the components 28 and 29 at the local maxima are determined. The same sequences then signify contour lines that are rising or falling in the same direction, but in the region between the optical axes 7 and 10 of the objectives 6 and 8 in Figure 1 a sign change occurs.

List of Reference Numbers

- | | |
|----|-----------------|
| 1 | device |
| 2 | surface |
| 3 | light source |
| 4 | lens |
| 5 | optical grating |
| 6 | objective |
| 7 | optical axis |
| 8 | objective |
| 9 | shadow grating |
| 10 | optical axis |
| 11 | field lens |
| 12 | camera |
| 13 | beam splitter |
| 14 | field lens |
| 15 | camera |
| 16 | black zone |
| 17 | opening |
| 18 | zone |
| 19 | zone |
| 20 | black zone |
| 21 | openings |
| 22 | width |

- 23 width
- 24 width
- 25 width
- 26 arrow
- 27 arrow
- 28 component
- 29 component
- 30 width
- 31 light intensity
- 32 light intensity
- 33 smoothed intensity

CLAIMS

1. Moiré method for measuring a surface, in which a periodic light grating is projected onto the surface, the light grating projected onto the surface is imaged onto a shadow grating, which has the same grating constant as the light grating imaged onto it, and the distribution of light intensities of the light grating imaged onto the shadow grating, which pass through the shadow grating, is evaluated, characterized by the fact that the light grating is asymmetrically formed.

2. Moiré method in accordance with Claim 1, characterized by the fact that the light grating has strips with two different flanks each.

3. Moiré method in accordance with Claim 1, characterized by the fact that the light grating has strips, each of which has two parallel zones of different color.

4. Moiré method in accordance with Claim 1, characterized by the fact that the light grating has strips, each of which has two parallel zones of different polarization.

5. Moiré method in accordance with Claim 3 or Claim 4, characterized by the fact that the two parallel zones have the same width (25, 30).

6. Moiré method in accordance with any of Claims 2 to 5, characterized by the fact that the shadow grating (9) has strip-like black zones (20) that completely block out light intensities of the light grating imaged onto it, whose width (24) is the same as the width (25 + 30) of the strips of the light grating.

7. Moiré method in accordance with any of Claims 3 to 6, characterized by the fact that the shadow grating (9) has strip-like black zones (20) that completely block out light intensities of the light grating imaged onto it, which are separated by the same distance (22) as the width (25 + 30) of the strips of the light grating.

8. Moiré method in accordance with Claim 5, characterized by the fact that the shadow grating (9) has strip-like black zones (20) that completely block out light intensities of the light grating imaged onto it, which are separated by the same distance (22) as the width (25, 30) of each parallel zone of the strips of the light grating.

9. Device for carrying out the moiré method in accordance with any of the preceding Claims 1 to 8, which has an optical grating that blocks out incident light except for a light grating; a light source that illuminates the optical grating from behind; a first objective that projects the light grating onto a surface; a second objective, which is oriented parallel to the first objective and images the light grating projected onto the surface onto a shadow grating; and a camera that records the light intensities of the light grating imaged onto the shadow grating which are not blocked out by the shadow grating; characterized by the fact that the optical grating (5) has openings (17) that are each divided into two zones (18, 19) with different optical properties, and that the camera (12) distinguishes the optical properties of the two zones (18, 19), or a beam splitter (13) and a second camera (15) are arranged in the beam path behind the shadow grating, and each of the two cameras (12, 15) records the light intensities with the optical properties of one of the two zones (18, 19).

10. Device in accordance with Claim 9, characterized by the fact that the optical grating (5) is a photographic reproduction of a colored pattern.

5 pages of drawings included
